

**SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN PARA EL MOLINO USADO
EN EL REPROCESO DE MATERIAL EN LA EMPRESA COMESTIBLES
INTEGRALES S.A**

JOHAN SEBASTIÁN CASTIBLANCO GARCÍA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2017

**SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN PARA EL MOLINO USADO
EN EL REPROCESO DE MATERIAL EN LA EMPRESA COMESTIBLES
INTEGRALES S.A**

JOHAN SEBASTIÁN CASTIBLANCO GARCÍA

Director:

ING. LUIS HERNANDO OCAMPO GIL

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2017

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Tecnológica de Pereira, a todos sus docentes y funcionarios por ser parte de esta etapa tan importante de mi vida la cual estoy culminando y por darme los conocimientos y las habilidades necesarias para enfrentarme al mundo laboral. A la empresa Comestibles Integrales SAS por darme la oportunidad de iniciar mi etapa productiva.

CONTENIDO

1.1 Contenido	
CONTENIDO	4
RESUMEN	5
GLOSARIO	6
INTRODUCCIÓN	7
1. OBJETIVO GENERAL	7
1.2 Objetivos específicos	7
2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	8
2.1 Material a transportar	8
2.1.1 Cantidad volumétrica de material molido	8
2.1.2 Peso volumétrico del material	9
2.2 Recolección de datos del recorrido del material	13
2.2.1 Diagramas de recorrido del material	13
2.2.2 Planos del molino	16
3. PROPUESTAS PLANTEADAS	17
3.1 Elevador de cangilones	18
3.1.1 Definición	18
3.1.2 Cálculo	18
3.2 Transportador de tornillo sinfín	25
3.2.1 Definición	25
3.2.2 Cálculo	25
3.3 Transportador Neumático	31
3.3.1 Definición	31
3.3.2 Cálculo	31
3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
3.5 CONCLUSIONES	41
4. BIBLIOGRAFÍA	41

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los pasos llevados a cabo para la selección de una máquina de elevación y transporte requerida en la empresa COMESTIBLES INTEGRALES SAS, la cual tendrá como función la alimentación del molino usado en el reproceso de galletas no conformes.

Para la selección de dicha máquina se siguió el siguiente procedimiento; en primera instancia se recopilaron los datos necesarios, los cuales son: longitud y dirección de recorrido del material, características del material a transportar, cantidad de material a transportar por unidad de tiempo, capacidad eléctrica disponible y dimensiones máximas que puede tener la máquina. Además se realizaron los diagramas de recorrido del proceso.

Con todos los datos recopilados se realizó el cálculo y estudio de las alternativas planteadas por el jefe de mantenimiento, el docente guía y el estudiante de las cuales se eligió la más adecuada teniendo en cuenta factores como: consumo de energía, seguridad ocupacional, simplicidad para su manipulación, entre otras.

GLOSARIO

MET (Máquina de elevación y transporte): Aparato o mecanismo utilizado para transportar horizontalmente, verticalmente o por pendientes cargas o materiales de diversa naturaleza.

MM (manipulación de materiales): Recibo, transporte, entrega en cualquier plano horizontal, vertical, inclinado o espacial de materiales en bruto, en proceso o completamente terminado. [1]

STM (Sistema de transporte de materiales): Conjunto de dispositivos, mecanismos, aparatos y equipos destinados a la manipulación de materiales, la cual cubre todas las operaciones de transporte a las que se somete un producto o material (sólido, líquido o gaseoso), excepto el trabajo de elaboración propiamente dicho. [1]

INTRODUCCIÓN

Comestibles Integrales S.A es una empresa que nace en el 2002 bajo el respaldo de Discentro Ltda., empresa de gran trayectoria a nivel nacional en la distribución de proyectos de consumo masivo; la cual se dedica a la producción de galleta salada tipo crackers en la categoría de tradicionales, saborizada y semidulces además de otras referencias. En la planta hay dos líneas de producción para satisfacer la demanda de los diferentes productos de la manera más eficiente y con la mejor calidad; en dichas líneas de producción se cuenta con un número de máquinas y equipos de diferente tipo como: máquinas térmicas, equipos de empaque automatizados y MET (máquina de elevación y transporte) entre otros, ya que todo el sistema de producción está principalmente apoyado en maquinaria es indispensable contar con un área de mantenimiento la cual se encargue de garantizar el correcto funcionamiento de los equipos además de llevar a cabo los proyectos que buscan mejorar continuamente productividad de la empresa y la calidad de los productos.

El contrato de aprendizaje propuesto por la empresa busca dar apoyo de ingeniería al área de mantenimiento para dar solución eficaz y pertinente a los problemas en los equipos y el desarrollo de los proyectos de mejora que se tienen propuestos.

1. OBJETIVO GENERAL

Seleccionar un sistema de alimentación para el molino usado en el procesamiento de producto no conforme en la Empresa Comestibles Integrales SA.

1.2 Objetivos específicos

- 1.2.1 Recolectar la información necesaria que permita el diseño, o selección de una MET (máquina de elevación y transporte) más eficiente para el caso en estudio.
- 1.2.2 Investigar los principales sistemas de transporte de material usados en la industria, que mejor den solución al problema en cuestión.

- 1.2.3 Proponer las alternativas más eficientes y económicamente viables que den solución al problema.
- 1.2.4 Realizar un análisis de dichas alternativas para determinar la más viable
- 1.2.5 Realizar la selección de la MET y el estudio necesario para su montaje y puesta en operación.

2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

El proceso de recolección de información es un trabajo de campo el cual se desarrolló en la empresa con el apoyo de las áreas de producción y mantenimiento para obtener los datos más verídicos posibles. Esta sección tiene dos fases, la recolección de datos físicos del recorrido del material y la recolección de datos propios del material a transportar.

2.1 Material a transportar

Para realizar el cálculo y la selección del transportador es necesario conocer principalmente el peso volumétrico del material y la cantidad promedio de material molido por unidad de tiempo.

2.1.1 Cantidad volumétrica de material molido

En promedio se muelen de 600 a 900 kg de material en 24 h, para efectos de cálculo se tomará el mayor valor del rango.

Se calcula la cantidad de material a moler en toneladas por hora; a este valor se le llamará eficiencia según la literatura consultada.

$$E = \frac{Masa [kg]}{tiempo [h]}$$

Ecuación 1. Eficiencia

$$E = \frac{900 \text{ kg} * (1 \text{ Ton} / 1000 \text{ kg})}{24 \text{ h}}$$

$$E = 0,0375 \text{ Ton/h}$$

2.1.2 Peso volumétrico del material

El peso volumétrico es el peso del material por unidad de volumen. Para este caso el material es galleta salada tipo cracker; existen tablas con diversos materiales a transportar y sus propiedades, sin embargo en este caso se elige determinar el peso específico del material de manera experimental debido a que las tablas no proporcionan información confiable sobre materiales tan específicos.

La determinación del peso volumétrico del material se hará por medio de un muestreo aleatorio simple.

Las muestras se tomarán en recipientes con las siguientes especificaciones¹:

Marca: Reyden

Referencia: 1H2/X225/S/13

Volumen: 120 L

Masa: 4,5 kg

Cantidad de material en kg que le caben al contenedor: 21 kg aproximadamente

¹ DANGEROUS GOODS PACKAGING SOLUTIONS. "Products". {En línea}. Disponible en: <http://www.air-sea.co.uk/products/un-plastic-drums/120l-un-hdpe-plastic-drum-1h2-x225-s.html>

Figura 1. Contenedor usado en la toma de muestras



Fuente: www.air-sea.co

El tamaño de la muestra se determina mediante la siguiente ecuación²:

$$n = \frac{z^2 pqN}{NE^2 + z^2 pq}$$

Ecuación 2. Tamaño de la muestra

Donde:

N : Tamaño de la población

n : Tamaño de la muestra

z : Nivel de confianza

p : Variabilidad positiva

q : Variabilidad negativa

E : Límite aceptable de error muestral

Para este caso:

N : El tamaño de la población es la cantidad de material molido en 24 hr en kg dividido en el peso por muestra promedio:

² DEVORE, Jay L. Probabilidad y Estadística para la Ingeniería y Ciencias. Traducido por Jorge Humberto Romo. 7 ed. México, D.F.: Cengage Learning Editores, S.A., 2008.p.15

$$N = \frac{900 \text{ kg}}{21 \text{ kg}}$$

$$N = 42,86 \approx 43$$

z: Para un porcentaje de seguridad del 95%; *z*=1,96 (según tabla de distribución estándar)

p y *q*: Como no se tienen antecedentes ni investigaciones previas se toma 0,5

E: Debido a que la toma de muestras no se hace en un medio controlado se toma un límite de error muestral alto (9%)

$$n = \frac{1,96^2 * 0,5 * 0,5 * 43}{(43 * 0,09^2) + (1,96^2 * 0,5 * 0,5)}$$

$$n = 31,55 \text{ muestras} \approx 32 \text{ muestras}$$

Una vez determinado el número de muestras se procede a la recolección de información como se describe a continuación.

Las muestras se toman en los recipientes anteriormente descritos los cuales son usados por los operarios para transportar el material y depositarlo en el molino.

Figura 2. Muestra.



Fuente: Autor.

El resultado de la toma de muestras se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Muestreo del material

TOMA DE MUESTRAS		Volumen: 120 L
No de muestra	Peso [kg]	Peso neto [kg]
1	24,2	19,7
2	24	19,5
3	25,7	21,2
4	25,7	21,2
5	24,3	19,8
6	25	20,5
7	25,5	21
8	24,8	20,3
9	24,5	20
10	24,8	20,3
11	25	20,5
12	25,3	20,8
13	24,9	20,4
14	24,7	20,2
15	25,1	20,6
16	24,9	20,4
17	25,5	21
18	25,4	20,9
19	24,7	20,2
20	24,9	20,4
21	25,3	20,8
22	25,4	20,9
23	25,3	20,8
24	24,5	20
25	24,6	20,1
26	24,8	20,3
27	25,3	20,8
28	25,3	20,8
29	24,4	19,9
30	24,9	20,4
31	24,8	20,3
32	24,5	20
Media peso neto		20,4

Fuente: Autor

Resultado: La medida del peso neto de la muestra es de 20,4 kg, con un porcentaje de confiabilidad del 95% y una desviación estándar de 0,44 kg.

Teniendo el peso del material y el volumen se procede a hallar el peso volumétrico de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{\text{Peso [kN]}}{\text{Volumen [m}^3\text{]}}$$

Ecuación 3. Peso volumétrico³

El peso en kilo newton es igual a 0,2 kN y el volumen del contenedor en metros cúbicos es igual a 0,12 m³; reemplazando en la Ecuación 3 se tiene:

$$\gamma = \frac{0,2 \text{ kN}}{0,12 \text{ m}^3}$$

$$\gamma = 1,67 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma = 169,95 \text{ kg/m}^3$$

2.2 Recolección de datos del recorrido del material

Para hacer el mejor estudio del caso se realizaron los diagramas de recorrido del material en la planta y los planos del molino; como se muestra a continuación.

2.2.1 Diagramas de recorrido del material

³ OCAMPO Gil. Luis Hernando. Máquinas de Elevación y Transporte. 2 Ed. Pereira Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira. 1993.

Los diagramas de recorrido del material se muestran en la siguiente imagen y representan el recorrido típico que debe hacer el operario en el proceso.

Los pasos en este proceso se pueden clasificar dentro de los cuatro elementos constitutivos de la manipulación de materiales; como se muestra a continuación.

- **Traslados:** El operario recoge el material de desperdicio que se acumula en los depósitos ubicados al lado de los cargadores en contenedores (Figura 1).

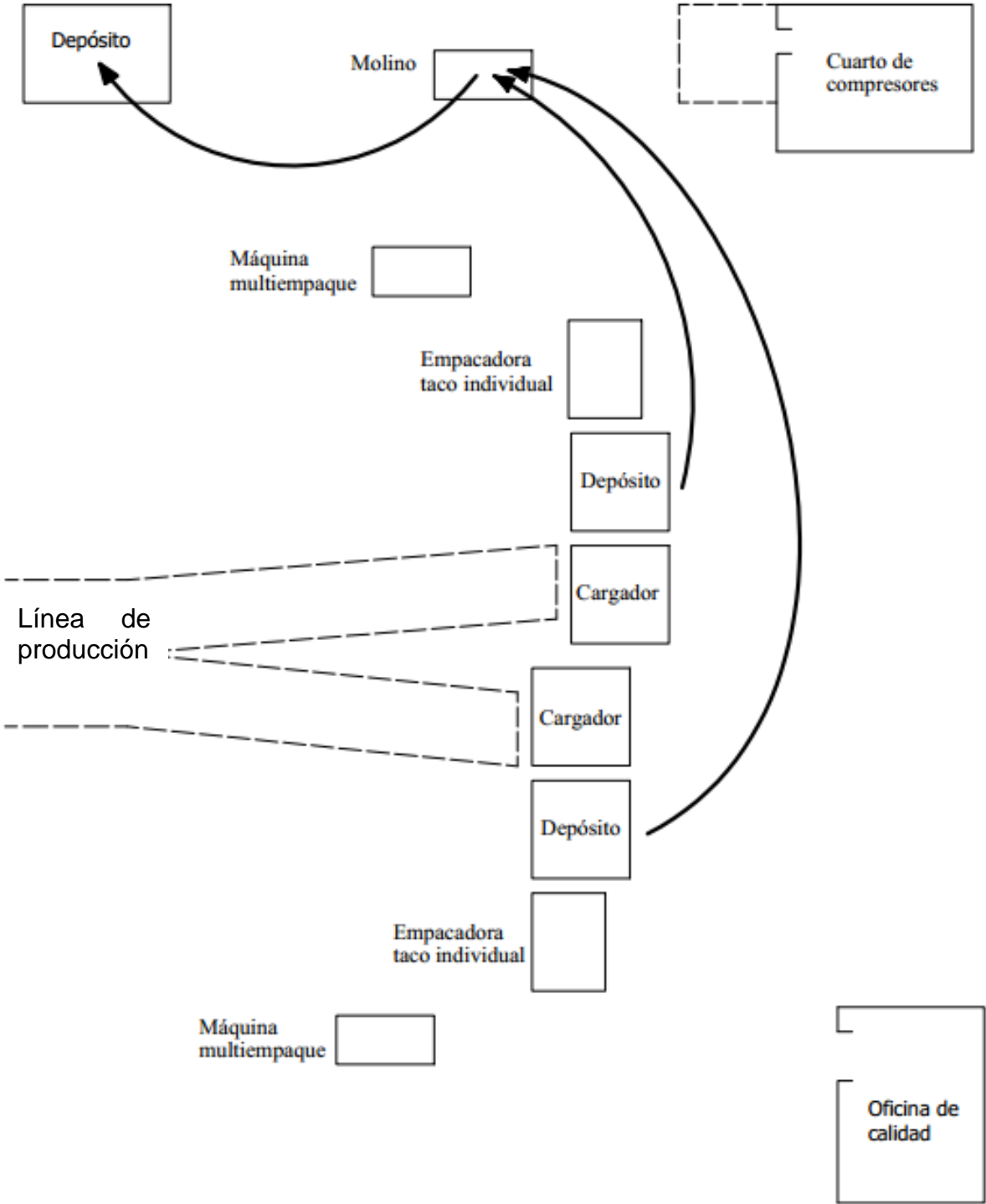
Después de la recolección el operario lleva el material hacia el molino como lo indican las flechas negras en la figura 4.

- **Movimiento o proceso:** Se debe alimentar el molino con el material recolectado, actualmente dicha alimentación se realiza manualmente llevando el material en los contenedores por una escala hasta la parte superior del molino y depositando el material.

-**Controles:** El material es pesado y clasificado.

-**Almacenamiento:** Una vez molido y registrado el material se lleva a un depósito donde queda a la espera del reproceso.

Figura 3. Diagrama de recorrido del proceso

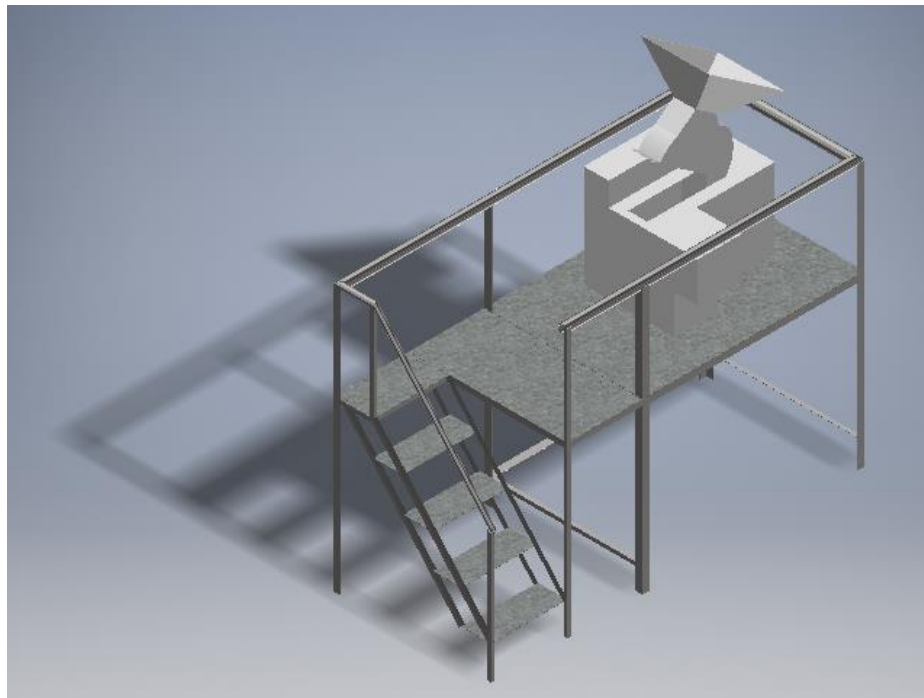


Fuente. Autor

2.2.2 Planos del molino

Ya que en la empresa no se contaba con los planos del molino usado el reproceso de material no conforme, se debieron realizar dichos planos en software de diseño, los cuales se adjuntan a continuación.

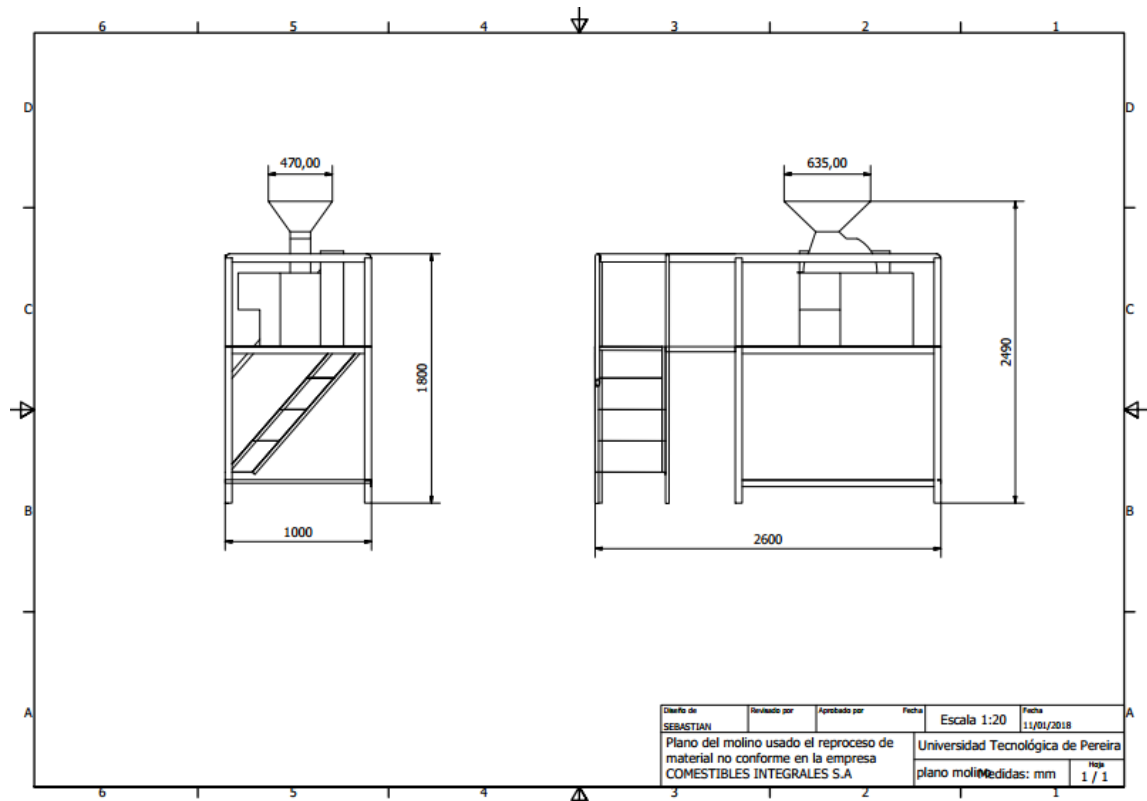
Figura 4. Modelado 3D del molino usado en el reproceso de material no conforme en la empresa COMESTIBLES INTEGRALES S.A.



Fuente. Autor

Es necesario conocer la altura del molino y otros datos pertinentes, los cuales se presentan en el siguiente plano.

Figura 5. Plano del molino usado en el reproceso de material no conforme en la empresa COMESTIBLES INTEGRALES S.A.



Fuente. Autor

3. PROPUESTAS PLANTEADAS

Las alternativas planteadas para el sistema de alimentación del molino usado para el reproceso de material no conforme en la empresa COMESTIBLES INTEGRALES SA, se realizaron en conjunto con el docente guía y el jefe de mantenimiento; dichas alternativas fueron propuestas teniendo en cuenta, grosso modo, el espacio disponible, los costos de mantenimiento y la practicidad de operación. Las alternativas propuestas son las siguientes:

- Elevador de cangilones
- Transportador de tornillo sinfín
- Transportador neumático

Para el análisis de dichas alternativas se realizaron los cálculos de potencia y capacidad para tener un indicativo a grandes rasgos del tamaño de la MET.

Por sugerencia del docente quía, y para tener un factor de seguridad apropiado se tomará la eficiencia igual a 0,2 Ton/hr.

3.1 Elevador de cangilones

3.1.1 Definición

Un elevador de cangilones es una MET encargada de transportar materiales a granel a lo largo de trayectorias verticales o ligeramente inclinadas, en recipientes denominados cangilones.

3.1.2 Cálculo

Para el cálculo del elevador de cangilones debemos tener presente los siguientes requerimientos para la alimentación del molino:

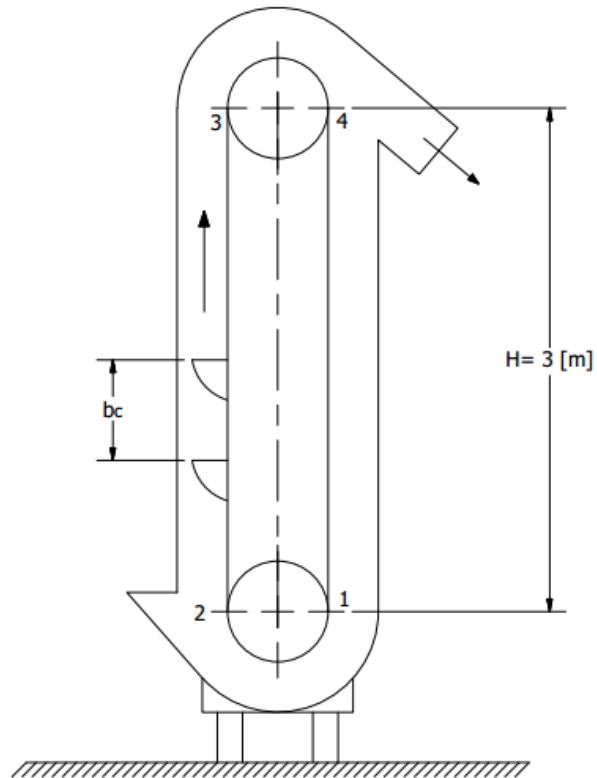
- Altura (H): 3 m
- Eficiencia (E): 0,2 Ton/hr
- Peso volumétrico del material (γ): 169,95 kg/m³ ~ 0,17 Ton/m³
- Condiciones de trabajo: Liviano, humedad normal, en espacio cubierto.

Se decide que la descarga del elevador de cangilones se haga por gravedad, para ello se tiene:

- Coeficiente de llenado (Φ): 0,8
- Velocidad (para cadena) $v=0,7$ m/s
- Velocidad (para banda) $v=1$ m/s
- Cangilón: tipo V (Recomendado por la literatura⁴).

⁴ OCAMPO Gil. Luis Hernando. Máquinas de Elevación y Transporte. 2 Ed. Pereira Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira. 1993.

Figura 7. Esquema del transportador de cangilones



Fuente. Autor

La capacidad lineal se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{I}{b_c} = \frac{E}{3,6 * v * \gamma * \phi}$$

Ecuación 4. Capacidad lineal para un elevador de cangilones

Donde:

I : Volumen del recipiente en litros.

b_c : Espacio entre cangilones en metros

Aplicando la ecuación 4, se tiene:

$$\frac{I}{b_c} = \frac{0,2}{3,6 * 1 * 0,17 * 0,8}$$

$$\frac{I}{b_c} = 0,41 [L/mm]$$

Con el valor calculado, se obtiene el paso b_c y el ancho de banda (B) de la tabla 2. Debido a que el valor calculado de capacidad lineal es menor que el mínimo valor de la tabla se aproxima al valor más cercano y se obtienen los siguientes datos:

$b_{cang}=160$ [mm]

$b_{banda}=200$ [mm]

$b_c= 160$ [mm]

$I= 0,65$ [L]

$i/b_c= 4,06$ [L/mm]

Tabla 2. Valores sugeridos de ancho de banda, ancho de cangilón, paso entre cangilones, volumen y capacidad lineal para cangilones en V

B cang [mm]	B banda [mm]	Paso entre cangilones b_c	Cangilones en v	
			I [Lt]	I/ b_c [Lt/mm]
160	200	160	0,65	4,06
200	250	200	1,3	6,5
250	300	200	2,0	10,0
320	400	250	4,0	16,0
320	400	250	6,4	25,6
400	500	320	8,0	25,0

Fuente. ⁵

⁵ OCAMPO Gil. Luis Hernando. Máquinas de Elevación y Transporte. 2 Ed. Pereira Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira. 1993.

Con el ancho de banda y el tipo de material (para materiales ligeros) se halla el número de lonas (*i*) en la siguiente tabla:

Tabla 3. Número de lonas

Ancho de banda	Materiales ligeros (Cereales)	Materiales medios (Carbón)	Materiales presados y abrasivos (Mineral)
Hasta 300 [mm]	4	4-5	5
300....500 [mm]	5	5-6	6
500....800 [mm]	5	6	7
Más de 800 [mm]	6	7	8

Fuente. ⁶

$i=4$

El diámetro del tambor motriz se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$D_{TM} = a * i$$

Ecuación 5. Diámetro del tambor motriz

Donde:

a: Coeficiente entre [125-250]

i: Número de lonas

Aplicando la ecuación 5 y asumiendo un coeficiente *a* de 125 se tiene:

$$D_{TM} = 125 * 4$$

⁶ OCAMPO Gil. Luis Hernando. Máquinas de Elevación y Transporte. 2 Ed. Pereira Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira. 1993.

$$D_{TM} = 500 \text{ mm}$$

Para calcular la velocidad del tambor motriz se aplica la siguiente ecuación:

$$n = \frac{60 * v}{\pi * D_{TM}}$$

Ecuación 6. Velocidad de rotación del tambor motriz

$$n = \frac{60 * 1}{\pi * 0,5}$$

$$n = 38,2 \text{ RPM}$$

El peso lineal de una banda sintética de cuatro lonas, usualmente oscila entre [3-5] kg/m; para efectos de cálculo se toma el mayor valor:

$$q_b = 5 \text{ kg/m}$$

El peso de los cangilones está dado por la siguiente ecuación:

$$q_{cang} = \frac{G_{cang}}{b_c}$$

Ecuación 7. Peso de los cangilones

Donde G_{cang} es el peso unitario de cada cangilón; para este caso si escogemos un cangilón tipo V en acero el peso es aproximadamente:

$$G_{cang} = 3 \text{ kg}$$

De esta manera aplicando la ecuación 7 se tiene:

$$q_{cang} = \frac{3 \text{ kg}}{0,32 \text{ m}}$$

$$q_{cang} = 9,375 \text{ kg/m}$$

El peso lineal de la carga se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$q_c = \frac{E}{3,6 * v * \phi}$$

Ecuación 8. Peso lineal de la carga

$$q_c = \frac{0,2 \text{ Ton/hr}}{3,6 * 1 \text{ m/s} * 0,8}$$

$$q_c = 0,069 \text{ kg/m}$$

La carga total de trabajo es la suma del peso lineal de la carga, el peso del cangilón y el peso lineal de la banda; dando como resultado el siguiente valor.

$$q_T = 14,44 \text{ kg/m}$$

La carga en vacío es igual a la suma del peso lineal del cangilón mas el peso lineal de la banda.

$$q_v = 14,375 \text{ kg/m}$$

Para determinar la potencia necesaria en el motor se deben hallar las tensiones en los puntos de la banda mostrados en la figura 7. Siguiendo las ecuaciones del libro guía se obtuvo el siguiente sistema:

$$T_2 = 1,08T_1 + k_D * q_c$$

$$T_3 = T_2 + q_T * H$$

$$T_4 = T_1 + q_v * H$$

$$T_3 = T_4 * e^{\mu\alpha}$$

Donde:

- K_D : Coeficiente de dragado

$$1,25 < K_D < 2,5$$

Material en polvo

$$2,5 < K_D < 4$$

Material en trozos

Se asume un valor de $K_D=3$ para material en trozos

- $\alpha=\pi$
- $\mu=0,1$

Reemplazando los valores de q_v , q_T , q_c , H , K_D , α y μ se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$T_2 = 1,08T_1 + 0,207$$

$$T_3 = T_2 + 43,32$$

$$T_4 = T_1 + 43,125$$

$$T_3 = 1,37T_4$$

Resolviendo el anterior sistema de ecuaciones se hallan los valores de las tensiones en los puntos 1, 2, 3y 4 respectivamente:

$$T_1 = 53,64 \text{ kg}$$

$$T_2 = 57,72 \text{ kg}$$

$$T_3 = 14,4 \text{ kg}$$

$$T_4 = 10,51 \text{ kg}$$

La fuerza periférica se halla usando la siguiente ecuación:

$$F = 1,08 * (T_3 - T_4)$$

Ecuación 9. Fuerza periférica

$$F = 1,08 * (14,4 - 10,51)$$

$$F = 4 \text{ kg}$$

La potencia de salida (P_s) y la potencia del motor (P_M) se hallan mediante las siguientes ecuaciones:

$$P_s = \frac{F * v}{102}$$

Ecuación 10. Potencia de salida

$$P_s = \frac{K * P_s}{\eta}$$

Ecuación 11. Potencia del motor

Donde:

K : 1,25

η : Rendimiento del accionamiento ~ 0,7

Aplicando las ecuaciones 10 y 11 se obtiene:

$$P_s = 38,13 \text{ W}$$

$$P_M = 68,1 \text{ W} \sim 0,1 \text{ HP}$$

Para el accionamiento se puede usar un motor trifásico de 1/4 caballo con caja reductora.

3.2 Transportador de tornillo sinfín

3.2.1 Definición

Un tornillo sinfín es una MET la cual transporta materiales a granel, líquidos o semilíquidos en trayectorias verticales, horizontales o inclinadas por medio de un tornillo giratorio el cual está inmerso en un conducto estático o canalón.

3.2.2 Cálculo

Para el cálculo del transportador de tornillo sinfín se usarán los mismos datos iniciales del transportador de cangilones, con algunas adiciones.

- Altura (H): 3 m
- Eficiencia (E): 0,2 Ton/hr
- Peso volumétrico del material (γ): 169,95 kg/m³ ~ 0,17 Ton/m³
- Condiciones de trabajo: Liviano, humedad normal, en espacio cubierto.
- La disposición del tornillo es inclinada con un ángulo de $\beta=20^\circ$

Inicialmente se debe encontrar el diámetro del tornillo usando la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt[3]{\frac{E}{15 * \pi * n * C_1 * \phi * K_c * \gamma}}$$

Ecuación 12. Cálculo de diámetro para tornillo sinfín

Donde:

Φ : Coeficiente de llenado, depende de las características del material y se halla mediante la (Tabla 4)

n : Velocidad de rotación del tornillo en RPM (Tabla 5)

C_1 : Coeficiente de paso

$C_1 = 1$ para diseños normales

$C_1 = 0,8$ para materiales lentos y abrasivos

Para este caso C_1 tomará el valor de 1

K_c : Coeficiente de eficiencia de carga, afecta el valor de la eficiencia cuando el tornillo está inclinado; se encuentra en la tabla 6 con el ángulo de inclinación del tornillo (β).

Para este caso se selecciona material medianamente abrasivo que fluye lentamente con un coeficiente de llenado igual a 0,25, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. Coeficiente de llenado del material

MATERIAL	Φ
Abrasivo que fluye lentamente	0,125
Medianamente abrasivo que fluye lentamente	0,25
Medianamente abrasivo que fluye libremente	0,32
No abrasivo que fluye libremente	0,42

Fuente. ⁷

La velocidad de rotación del tornillo se encuentra en la tabla 5 y depende de la eficiencia del material en m³/hr y del coeficiente de llenado Φ .

Al multiplicar la eficiencia del material por el recíproco del peso específico se obtiene la eficiencia del material expresada en m³/hr.

$$E_m = 0,2 \text{ m}^3/\text{hr} * \frac{1}{0,17 \text{ Ton}/\text{m}^3}$$

$$E_m = 1,18 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Se obtiene una eficiencia del material 1,18 m³/hr y con un coeficiente de llenado entre [15-30] %.

⁷ OCAMPO Gil. Luis Hernando. Máquinas de Elevación y Transporte. 2 Ed. Pereira Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira. 1993.

Tabla 5. Velocidad de giro del tornillo

DIÁMETRO DEL TORNILLO D [mm]	CLASE 1 $\Phi=45\%$		CLASE 2 $\Phi=30\%$		CLASE 3 $\Phi=15\%$	
	E [m3/hr]	n [RPM]	E [m3/hr]	n [RPM]	E [m3/hr]	n [RPM]
100	3,5	180	1	125	----	----
200	23	140	11,5	100	4	63
400	120	100	57	71	18	45
500	195	90	90	63	29	40

Fuente. ⁸

La velocidad de giro para el tornillo según la tabla anterior es de 125 RPM aproximadamente.

Tabla 6. Coeficiente de eficiencia de carga

β	0°	5°	10°	15°	20°
kc	1,0	0,9	0,8	0,7	0,65

Fuente. ⁹

Aplicando la ecuación 12 se tiene:

$$D = \sqrt[3]{\frac{0,2 \text{ Ton/hr}}{15 * \pi * 125 \text{ 1/min} * 1 * 0,25 * 0,65 * 0,17 \text{ Ton/m}^3}}$$

$$D = 0,53 \text{ m}$$

⁸, ⁹ OCAMPO Gil. Luis Hernando. Máquinas de Elevación y Transporte. 2 Ed. Pereira Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira. 1993.

Con el valor del diámetro se encuentra el paso del tornillo usando la siguiente ecuación:

$$p = C_1 * D$$

Ecuación 13. Paso del tornillo

$$p = 1 * 53 \text{ cm}$$

$$p = 53 \text{ cm}$$

La potencia en el eje motriz se halla por medio de la siguiente ecuación

$$P = \frac{E * L}{367} * (K_R \pm \text{sen } \beta)$$

$$P = \frac{0,2 \text{ Ton/hr} * 6 \text{ m}}{367} * (K_R \pm \text{sen } \beta)$$

Donde

L : Longitud del tornillo en m.

K_R : Coeficiente de resistencia; para este caso se toma el valor de 24 aproximadamente

$$P = \frac{0,2 \text{ Ton/hr} * 8 \text{ m}}{367} * (24 \pm \text{sen } 20)$$

$$P = 0,11 \text{ kW} \sim 0,15 \text{ HP}$$

La potencia requerida del motor se obtiene de igual manera que para el caso anterior dividiendo la potencia en el rendimiento del motor:

$$P_M = \frac{0,11 \text{ kW}}{0,7}$$

$$P_M = 0,15 \text{ kW} \sim 0,2 \text{ HP}$$

El torque en el eje del tornillo se obtiene usando la siguiente ecuación:

$$T = 97400 * \frac{P}{n}$$

Ecuación 14. Torque en el eje del tornillo

$$T = 97400 * \frac{0,11 \text{ kW}}{0,7}$$

$$T = 14755 \text{ kg} - \text{cm}$$

Por último se encuentra la velocidad lineal del material usando la siguiente ecuación:

$$v = \frac{p * N}{60}$$

$$v = \frac{0,53 * 125}{60}$$

$$v = 1,1 \text{ m/s}$$

3.3 Transportador Neumático

3.3.1 Definición

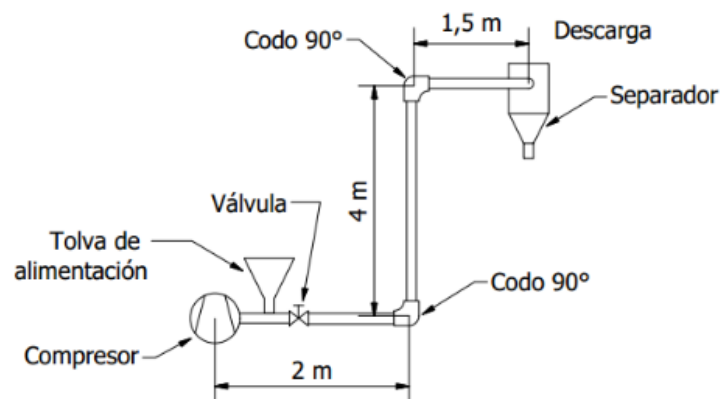
El transportador neumático es un dispositivo usado para transportar materiales a granel, es de acción continua y utiliza una corriente de aire producida por presión o succión para suspender las partículas de material y transportarlas por una tubería; con senderos horizontales, verticales e inclinados.

3.3.2 Cálculo

Los datos necesarios para el cálculo del transportador neumático son los mismos que para los ítems anteriores a excepción de la altura (H) a la cual se le añadió 1 m, espacio suficiente para el separador, el cual se muestra en el esquema del recorrido:

- Altura (H): 4 m
- Eficiencia (E): 0,2 Ton/hr
- Peso volumétrico del material (γ): 169,95 kg/m³ ~ 0,17 Ton/m³
- Condiciones de trabajo: Liviano, humedad normal, en espacio cubierto.
- El esquema del recorrido se presenta en la siguiente figura:

Figura 8. Esquema del transportador neumático



Fuente. Autor

Inicialmente se debe hallar la longitud reducida que está dada por la suma de las longitudes horizontal y vertical de la tubería, más las longitudes equivalentes a los accesorios.

Para este caso se tienen los siguientes valores de longitud horizontal (L_H) y longitud vertical (L_V):

$$L_H = 3,5 \text{ m}; L_V = 4 \text{ m}$$

Las longitudes equivalentes de los accesorios (codos L_{EC}) y (válvulas L_{EV}) se determinan mediante las siguientes tablas:

Tabla 7. Longitudes equivalentes para accesorios en tuberías

MATERIAL	VALORES DE L_{EC} EN [m] PARA R_0/D			
	4	6	10	20
Polvo	4-8	5-10	6-10	8-10
Granos homogéneos	----	8-10	12-16	16-20
Terrones irregulares pequeños	----	----	28-35	38-45
Terrones irregulares grandes	----	----	60-80	70-90
R0- Radio de curvatura del codo				
D- Diámetro interno de la tubería				

Fuente. ¹⁰

¹⁰ OCAMPO Gil. Luis Hernando. Máquinas de Elevación y Transporte. 2 Ed. Pereira Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira. 1993.

Se asume R_0/D igual a 10, y material (terrones irregulares pequeños); obteniendo una longitud equivalente entre [28-35] m para un codo; se toma el máximo valor (30 m) y se multiplica por el número de codos:

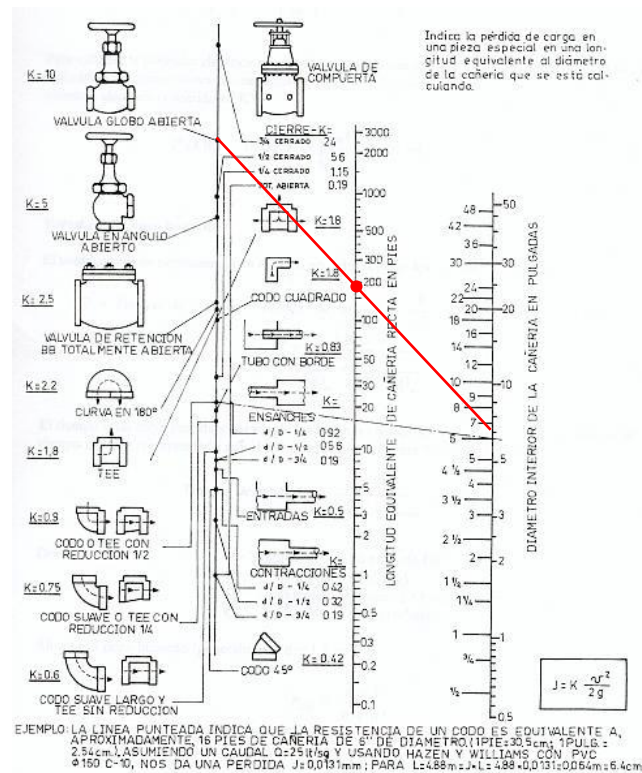
$$L_{EC} = 30 \text{ m} * 2$$

$$L_{EC} = 60 \text{ m}$$

Para la longitud equivalente de la válvula se asume una tubería de acero inoxidable de 6 in de diámetro nominal, cédula 10, con un diámetro interior igual a 6,357 in¹¹. Se elige una válvula de globo para la regulación de caudal.

La longitud equivalente se halla al trazar una línea desde la válvula de globo hasta el valor del diámetro interno de la tubería en la siguiente figura:

Figura 9. Longitudes equivalentes en válvulas



Fuente. ¹²

¹¹ JN ACEROS. "Tubos de acero inoxidable". {En línea}. Disponible en: <http://www.jnaceros.com.pe/index.php/productos/tubos>

¹² KARASSIK, Igor et al. Pump Handbook. 3a Ed. USA: McGraw-Hill., 2001.

La longitud equivalente hallada para la válvula es:

$$L_{EV} = 200 \text{ ft} \sim L_{EV} = 60,96 \text{ m}$$

La longitud reducida es igual a la suma de las longitudes halladas anteriormente:

$$L_R = 3,5 \text{ m} + 4 \text{ m} + 60 \text{ m} + 60,96 \text{ m}$$

$$L_R = 128,46 \text{ m}$$

Lo siguiente es calcular la velocidad del aire usando la siguiente ecuación:

$$v_a = K_1 * \sqrt{\gamma} + K_2 * L_R^2$$

Ecuación 15. Velocidad de la corriente de aire en la tubería

Donde:

K_1 : Factor de tamaño de las partículas del material transportado (Tabla 8).

K_2 : Factor que oscila entre $[2-5] \times 10^{-5}$, según la humedad y el tamaño de las partículas del material a transportar.

Tabla 8. Factor de tamaño

MATERIAL	TAMAÑO MÁXIMO DE LAS PARTÍCULAS	K1
Polvo	1-1000 Micrómetros	10-16
Granos homogéneos	1-10 [mm]	17-20
Terrones pequeños homogéneos	10-20 [mm]	17-22
Terrones medios homogéneos	40-80 [mm]	22-25

Fuente. ¹³

¹³ OCAMPO Gil. Luis Hernando. Máquinas de Elevación y Transporte. 2 Ed. Pereira Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira. 1993.

De la tabla anterior se toma:

$$K_1 = 25$$

El factor K_2 se toma igual a 5×10^{-5} ya que a pesar de ser un material seco, contiene partículas no homogéneas medianamente grandes.

Aplicando la ecuación 15:

$$v_a = 25 * \sqrt{0,17 \text{ Ton}/m^3 + 5 * 10^{-5} * (128,46 \text{ m})^2}$$

$$v_a = 11,13 \text{ m/s}$$

El consumo de aire se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$V_a = \frac{\pi * D^2}{4} * v_a$$

Ecuación 16. Consumo de aire

Donde:

D: Diámetro interior de la tubería (6,357 in ~ 0,16 m)

$$V_a = \frac{\pi * (0,16 \text{ m}^2)}{4} * 11,13 \text{ m/s}$$

$$V_a = 0,22 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para un transportador neumático de compresión el valor de la presión en el punto inicial de la tubería viene dado por la siguiente ecuación:

$$P_i = \sqrt{1 - \frac{K_3 * C_P * L_R * v_a^2}{D}} \pm P_H$$

Ecuación 17. Presión inicial para un transportador a compresión

Donde:

P_i : Presión absoluta en el punto inicial de la tubería

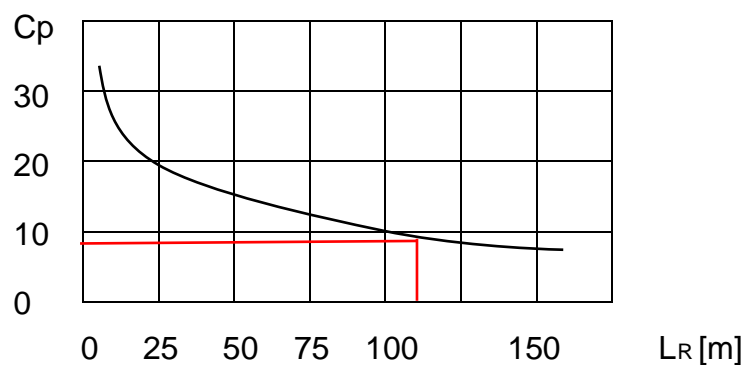
C_P : Concentración de la mezcla (Figura 10)

P_H : Presión que tiene en cuenta las elevaciones (Ecuación 18)

K_3 : Factor de corrección (Figura 10)

La concentración de la mezcla (C_P) se obtiene de la siguiente figura:

Figura 10. Concentración de la mezcla



Fuente. ¹⁴

¹⁴ OCAMPO Gil. Luis Hernando. Máquinas de Elevación y Transporte. 2 Ed. Pereira Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira. 1993.

$$C_P \sim 8$$

La presión (P_H) se calcula usando la siguiente ecuación:

$$P_H = \frac{H * \gamma_a * C_P}{10^4}$$

Ecuación 18. P_H

Donde:

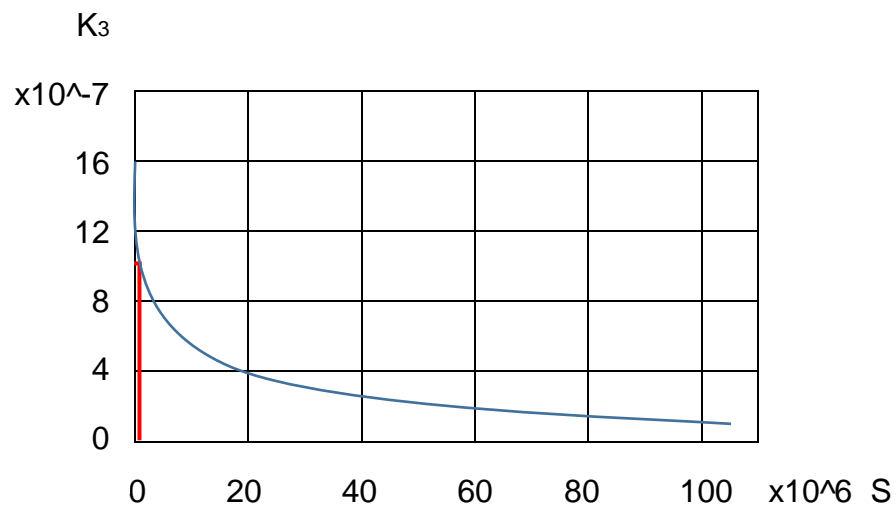
γ_a : Peso volumétrico del aire a presión atmosférica (1,6 kg/m³)

Aplicando la ecuación 18 se obtiene:

$$P_H = \frac{4 * 1,6 * 8}{10^4}$$

$$P_H = 0,00512 \text{ kg/cm}^2$$

Figura 11. Factor de corrección (K_3) para transportadores a compresión



Fuente. ¹⁵

¹⁵ OCAMPO Gil. Luis Hernando. Máquinas de Elevación y Transporte. 2 Ed. Pereira Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira. 1993.

(S) está dado por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{C_P * L_R * v_a^2}{D}$$

Ecuación 20. Parámetro (S)

$$S = \frac{8 * 128,46 \text{ m} * (11,22 \text{ m/s})^2}{0,16 \text{ m}}$$

$$S \approx 1 * 10^6$$

Con el valor de S se obtiene K_3 de la figura 11.

$$K_3 \sim 10 * 10^{-7}$$

Aplicando la ecuación 17:

$$P_i = \sqrt{1 + \frac{10 * 10^{-7} * 8 * 128,46 \text{ m} * (11,13 \text{ m/s})^2}{0,16 \text{ m}}} \pm 0,0064 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_i = 1,346 \text{ kg/cm}^2$$

La presión total a la salida del compresor (P_c) es aproximadamente:

$$P_c = K_4 P_i + P_D$$

Ecuación 21. Presión total a la salida del compresor

K_4 es un factor de pérdidas en la unidad de entrada cuyo valor oscila entre 1,15 y 1,25; para este caso se tomará el valor de 1,20.

P_D es la pérdida de presión en la tubería principal y se toma aproximadamente de 0,3 kg/cm².

De esta manera aplicando la ecuación anterior se tiene:

$$P_c = 1,20 * 1,346 + 0,3 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_c = 1,91 \text{ kg/cm}^2$$

Una vez obtenidos los datos anteriores se procede a realizar el cálculo de la potencia del motor del compresor haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{W * V'_a}{6 * 102 * n}$$

Ecuación 22. Potencia en el motor del compresor

Donde:

n : Rendimiento del compresor, aproximadamente igual a 0,8

W : Trabajo del compresor durante la compresión isotérmica por [m³] de aire. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W = 23030 * P_0 * \log\left(\frac{P_c}{P_0}\right)$$

P_0 es la presión atmosférica, para este caso se tomará la presión atmosférica de Pereira igual al 86 KPa o 0,877 kg/cm².

$$W = 23030 * 0,877 * \log\left(\frac{1,91}{0,877}\right)$$

$$W = 6853,54 \text{ kg} * \text{m/m}^3$$

V'_a es la capacidad o consumo de aire del compresor en m³/min y está definido por la siguiente expresión:

$$V'_a = K_5 * V_a$$

Ecuación 23. Consumo de aire del compresor

K₅ es el factor de incremento que considera las pérdidas por fugas, es aproximadamente igual a 1,1.

$$V'_a = 1,1 * 0,22 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V'_a = 0,242 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P = \frac{6853,54 \text{ kg} * \text{m} / \text{m}^3 * 0,242 \text{ m}^3/\text{s}}{6 * 102 * 0,8}$$

$$P = 3,3 \text{ kW} \sim 4,43 \text{ HP}$$

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- El elevador de cangilones presenta la potencia más bajas de los tres escenarios en estudio (0,1 HP aproximadamente); adicionalmente es la alternativa cuyo funcionamiento y manipulación presenta mayor simplicidad. Por otra parte al tener una disposición vertical el área a ocupar es menor comparado con el transportador de tornillo sinfín y el neumático.
- El transportador de tornillo sinfín presenta una potencia de (0,2 HP aproximadamente), en cuanto al mantenimiento se deduce que es más complejo en comparación al elevador de cangilones dado que sus componentes principales están contacto y sufren mayor desgaste por fricción además de presentar mayor peso. Ya que presenta una disposición inclinada requiere una mayor área de trabajo.
- El transportador neumático es el que requiere mayor potencia para su funcionamiento (4,43 HP) comparado con las tres alternativas propuestas. Teniendo en cuenta su diseño (ver Figura 8.) requiere un mayor espacio de trabajo. Al tener un mayor número de componentes aumenta su complejidad en cuanto al funcionamiento y mantenimiento.

3.5 CONCLUSIONES

A través de investigación de campo se recolectó la información necesaria que permitió definir la situación actual del proceso: Molido de producto no conforme, en la empresa COMESTIBLES INTEGRALES SA.

Con base a investigación literaria se determinó que el elevador de cangilones, el transportador de tornillo sinfín y el transportador neumático son MET que se ajustaban al caso en estudio; de esta manera utilizando los datos recolectados se realizaron los cálculos pertinentes para la selección de la MET.

La MET más viable para mejorar el proceso en cuestión es el elevador de cangilones, teniendo en cuenta el consumo de energía, el espacio a ocupar, la manipulación y el mantenimiento.

4. BIBLIOGRAFÍA

OCAMPO Gil, Luis Hernando. Máquinas de Elevación y Transporte. 2 Ed. Pereira Risaralda. Universidad Tecnológica de Pereira. 1993.

DEVORE, Jay L. Probabilidad y Estadística para la Ingeniería y Ciencias. Traducido por Jorge Humberto Romo. 7 ed. México, D.F.: Cengage Learning Editores, S.A., 2008.p.15

KARASSIK, Igor et al. Pump Handbook. 3a Ed. USA: McGraw-Hill., 2001.

WEBGRAFÍA

DANGEROUS GOODS PACKAGING SOLUTIONS. "Products". {En línea}. Disponible en: <http://www.air-sea.co.uk/products/un-plastic-drums/120l-un-hdpe-plastic-drum-1h2-x225-s.html>

JN ACEROS. "Tubos de acero inoxidable". {En línea}. Disponible en: <http://www.inaceros.com.pe/index.php/productos/tubos>